

DOI: 10.5846/stxb201404170750

余亚东, 陈定江, 胡山鹰, 朱兵. 经济系统物质流分析研究述评. 生态学报, 2015, 35(22): - .

Yu Y D, Chen D J, Hu S Y, Zhu B A Critical Review of Economy-wide Material Flow Analysis. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): - .

经济系统物质流分析研究述评

余亚东^{1,3}, 陈定江^{1,2}, 胡山鹰^{1,2}, 朱 兵^{1,2,*}

1 清华大学化学工程系生态工业研究中心, 北京 100084

2 清华大学循环经济研究院, 北京 100084

3 华东理工大学商学院, 上海 200237

摘要:作为研究经济系统物质代谢的重要方法,经济系统物质流分析方法近年来在资源与环境管理领域得到了广泛的应用,理论发展非常迅速。本文对经济系统物质流分析进行了系统综述,以期为更深入的理论研究提供参考。本文首先系统回顾了经济系统物质流分析的发展历史,介绍了其核算框架和指标体系。其次,重点对经济系统物质流分析的研究现状进行了总结和述评,研究表明:(1)在经济系统物质流分析指标的核算研究方面:国家层面的核算研究多,方法较为成熟,而区域层面的核算研究尚未形成成熟的核算框架;针对直接流指标的核算研究多,而包含间接流或隐藏流的综合指标的核算方法研究不足;(2)在经济系统物质流分析指标的变化原因研究方面,目前的研究较少,研究方法包括分解分析法和回归分析法:前者多基于 IPAT 方程的直接分解法,难以考察经济系统内部的结构和技术的变化对经济系统物质流分析指标的影响,而后者则在所识别的经济系统物质流分析指标的影响因素方面具有较大差异。最后,本研究在总结当前研究不足的基础上提出了经济系统物质流分析的未来研究方向。

关键词:经济系统物质流分析;核算框架;指标体系;分解分析;回归分析

A Critical Review of Economy-wide Material Flow Analysis

YU Yadong^{1,3}, CHEN Dingjiang^{1,2}, HU Shanying^{1,2}, ZHU Bing^{1,2,*}

1 Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2 Institute of Circular Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3 School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: Economy-wide material flow analysis (EW-MFA) and relevant indicators have been designed to monitor material flows at the macroeconomic level and to provide indicators that could contribute to the management of resource use and output emission flows from economic, environmental, and broader sustainability perspectives. Recently, EW-MFA has been rapidly developed in theoretical research and widely used as an important tool in resource and environment management. A systematic review of the theoretical research on EW-MFA is performed in this study, and this review is expected to serve as a reference for future theoretical research on EW-MFA. First, a brief outline of the historical development of EW-MFA over the past 50 years is presented, the accounting framework and indicator systems of EW-MFA are introduced, and the pros and cons of EW-MFA indicator aggregation are discussed. Second, the state-of-the-art of EW-MFA is summarized and discussed as a key component in the accounting of EW-MFA indicators as well as the driving forces and dynamics of EW-MFA indicators. The following two issues were observed: (1) In the accounting of EW-MFA indicators, research work has fully matured at the national level because there is a standardized accounting framework and database, while research work is far from mature at the regional level, including the provincial level and city level, because no unified accounting

基金项目:国家十二五科技支撑计划课题(2012BAC03B01);NSFC-IIASA 国际合作基金项目(71161140354)

收稿日期:2014-04-17; 网络出版日期:2015-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bingzhu@tsinghua.edu.cn

framework exists. In addition, previous research has mainly focused on direct flow indicators, such as direct material input and domestic material consumption, while not sufficiently focusing on comprehensive indicators, which aggregate direct flow indicators with indirect flow indicators and hidden flow indicators, such as the raw material consumption (RMC) and total material requirement. (2) Fewer studies have examined the driving force and dynamics of EW-MFA indicators than those that have examined the accounting of EW-MFA indicators, and the research methods can be divided into decomposition analysis and regression analysis. For the decomposition analysis of EW-MFA indicators, the IPAT equation, index decomposition analysis (IDA), and structure decomposition analysis (SDA) are employed. The IPAT equation is the most commonly used method for analyzing the driving force of EW-MFA indicators; however, this equation can hardly reveal the effect of economic structure and technology in the economic system on EW-MFA indicators. IDA and SDA can overcome this deficiency; however, thus far, there have been few such studies. For the regression analysis of EW-MFA indicators, no consistent conclusions concerning which factors are the driving forces of EW-MFA indicators have been drawn, although some factors have been frequently suggested as affecting resource productivity, such as income level and population density. Finally, we propose the directions for future research by summarizing the shortcomings of the current research on EW-MFA with respect to the following goals: (1) disaggregating EW-MFA data to economic sectors; (2) promoting research on accounting for comprehensive indicators of EW-MFA, especially for RMC; (3) developing an accounting framework of EW-MFA on the regional level; and (4) stimulating research on the driving forces and dynamics of EW-MFA indicators.

Key Words: economy-wide material flow analysis (EW-MFA); accounting framework; indicator system; decomposition analysis; regression analysis

物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)是一种以物质守恒为基本原理,定量地评估具有时空边界的经济-环境系统中物质的存量与流量,从而追踪物质在该系统中流动的源、路径和汇的研究方法^[1]。根据研究的对象,MFA分为元素流分析(Substance Flow Analysis, SFA)和经济系统物质流分析(Economy-wide Material Flow Analysis, EW-MFA)。前者关注单独的元素或化合物,而后者则关注一定时间范围内物质的总量与结构(又称 Bulk-MFA)^[2]。

自20世纪60年代以来,EW-MFA在近五十年的发展中逐渐形成了以进出社会经济系统与自然环境系统边界的所有物质(水除外)为核算对象,以质量守恒为核算原理的核算框架。在此框架下,EW-MFA得到了一系列表征经济系统的物质利用量、环境压力与资源效率等指标,并在资源与环境政策领域得到了广泛的应用。

在理论研究方面,EW-MFA涉及面较广,已有一些文献从不同的切入点对EW-MFA研究进行了综述^[2,3-7],如将EW-MFA与SFA一同进行综述、侧重于产业生产系统或生态工业园区的物质代谢方法的综述、侧重于EW-MFA指标核算研究的综述以及侧重于EW-MFA指标应用研究的综述。目前而言,已有综述对EW-MFA指标的变化原因研究的关注还较少;此外,近年来EW-MFA在资源与环境政策领域得到了广泛的应用,其理论研究发展非常迅速,需要对其最新研究进展进行系统的总结。鉴于此,本文将对EW-MFA的发展历史、核算框架与指标体系、研究现状(包括指标核算与指标变化原因研究现状)和未来研究方向进行系统综述,以期对EW-MFA的深入研究提供参考。

1 EW-MFA的发展历史

EW-MFA作为研究经济生产活动中物质资源新陈代谢的重要方法,其基本思想的发端可追溯到一百多年以前^[8]。Fischer-Kowalski等^[8-10]曾系统总结了EW-MFA的发展历史,认为EW-MFA的早期研究可追溯至20世纪60年代,代表性的研究包括:1965年,美国城市学家Wolman提出了城市代谢的概念,并以一百万人口的虚拟美国城市为例,估算了水、燃料、食品的输出以及废物和污染物的输出^[11];1969年,美国物理学家Ayres与经济学家Kneeses将物质平衡的思想引入国家经济系统,成为国家物质流分析研究的最早版本^[12]。

1974年,苏联经济学家 Gofman 基于苏东集团的计划经济体系,提出了包括水、空气与原材料在内的综合物质流核算框架^[13];此后,美国、奥地利、瑞士等国的学者进一步完善了社会代谢与工业代谢理论,为物质流分析奠定了物理与生态学基础。

经过二十多年的探索,随着可持续发展研究的深入,EW-MFA 从 20 世纪 90 年代起进入了全面发展期。20 世纪 90 年代初,日本的国立环境研究所(National Institute for Environmental Studies)、德国的伍珀塔尔研究所(Wuppertal Institute)与奥地利的社会生态研究所(Institute for Social Ecology)率先对各自国家经济系统的自然资源和物质的流动状况进行了分析,从而揭开了 EW-MFA 在世界范围广泛研究和应用的序幕。

1996年,欧盟委员会组建了“ConAccount”平台,成为 EW-MFA 研究国际合作的里程碑。1997年,在荷兰莱顿和德国伍珀塔尔各举办了一次 ConAccount 会议^[14-15],进一步促进了各国间的合作交流。自 1997 年开始,世界资源研究所开始对美国、日本、奥地利、德国和荷兰这五国的经济系统的物质流动状况进行了全面的分析,五国学者合作发表两份研究报告《Resource Flows》和《The Weight of Nations》^[16-17],正式提出了 EW-MFA 的概念和框架,定义了一系列分析指标,并且得到了上述五国经济系统的物质输入和输出总量及相关衡量指标。

国际合作交流促进了 EW-MFA 相关框架和指标等标准的形成,推动了 EW-MFA 的研究进展。欧盟统计局(Eurostat)在其中发挥了关键的作用。2001年,Eurostat 正式出版《Economy-wide material flow accounts and derived indicators: A methodological guide》^[18],提出了 EW-MFA 的标准方法;2007—2013 年间,Eurostat 对核算方法进行了五次更新,并于 2013 年发布了更为系统而详尽的 EW-MFA 编制指导手册^[19]。此外,自 2004 年以来,经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)对 EW-MFA 的研究与应用也起到了重要的推动作用;2008年,OECD 发布系列研究报告,为 EW-MFA 的核算提供了非常系统的指南^[20];2013年,OECD 进一步发布报告,对基于 EW-MFA 的资源产出率的进展进行了综合评估^[21]。

2 EW-MFA 的核算框架与指标体系

Eurostat 和 OECD 报告中提出的国家层面上 EW-MFA 核算框架如图 1 所示,该框架将物质世界分为自然环境系统和社会经济系统两个子系统,按照质量守恒原理对进出系统边界的各种物质进行核算。其中,社会经济系统被视为黑箱,其输入的物质主要包括国内开采使用量(Domestic Extraction Used, DEU)和进口物质(Import, IMP),而输出的物质则主要包括返回到自然环境中的废弃物和排放物(Domestic Process Output, DPO)和出口物质(Export, EXP)。

对于一定时期内进出系统的各种具体物质,EW-MFA 核算均以质量为单位进行加和(Aggregation),形成相关综合的指标。为此,Eurostat 提供了一套质量转换系数,将统计中非质量计量物质的计量单位转化成质量。然而,以质量加和的指标综合方法不仅对物质的经济和环境意义缺乏足够的考虑,而且也存在因大宗资源的“遮蔽效应”而掩盖其它资源信息的弊病,曾遭到过一些批评和争议^[20, 22-32]。尽管一些学者从环境影响、经济价值、热力学的角度提出了不同的指标加和方法,如“基于环境影响的加和方法”^[31]、“基于相对价格系数的加和方法”^[32]以及“基于有用功(Useful Work)的加和方法”^[28]等,但这些方法都有着各自的利弊,目前应用很少。目前而言,质量加和方法已得到了 MFA 理论界的较高认可和实践的广泛应用,成为国际通行的 EW-MFA 指标加和方法。实际上,EW-MFA 核算更重要的目的在于提供一个全面的物质流动数据信息库^[20],数据的加和方法可根据不同的需要进行不同的处理。

根据 EW-MFA 的核算框架和质量加和的指标综合方法,可得到经济系统的物质输入与输出的系列基本指标。这些指标可分为两类:直接流指标,如直接物质投入(Direct Material Input, DMI)和区域内资源消耗(Domestic Material Consumption, DMC)等,表征经济系统的直接物质利用量和系统物质代谢过程的直接环境压力;包含间接流或隐藏流的综合指标,如区域原生资源消耗当量(Raw Material Consumption, RMC)、总物质需求(Total Material Requirement, TMR)、总物质消耗(Total Material Consumption, TMC)等,表征经济系统的生

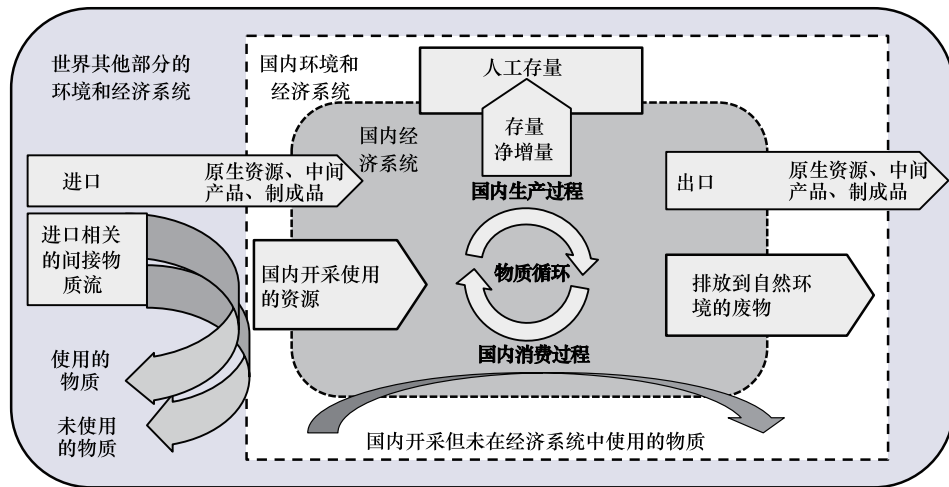
图1 EW-MFA的基本核算框架^[20]

Fig. 1 Accounting Framework of EW-MFA

命周期过程的物质利用量和系统物质代谢生命周期过程的环境压力^[20,33]。EW-MFA 各基本指标之间的关系可参见 OECD 报告的详细介绍^[20]。

EW-MFA 的基本指标与国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)、人口、土地面积等社会经济指标相结合,可衍生出一系列效率、强度、投入产出比、贸易等指标^[20]。其中,资源产出率(Resource Productivity),即 GDP 与资源利用量(如 DMC)的比值,在世界许多国家的资源与环境政策领域具有广泛的应用,也被中国政府用作衡量循环经济发展水平的综合指标^[34]。

3 EW-MFA 的研究现状

当前,EW-MFA 的研究分为指标核算和指标变化原因研究两方面,以下对其分别进行综述。

3.1 EW-MFA 指标的核算研究现状

根据研究对象的尺度,EW-MFA 指标核算研究可分为国家层面、区域层面(省域、城市)和行业层面^[4]。由于行业层面 EW-MFA 研究通常更侧重于关注特定的物质或特定类别的物质,与 SFA 类似,本研究不对其进行综述。

3.1.1 国家层面上 EW-MFA 指标核算研究

(一) 直接流指标

自 2001 年 Eurostat 发布 EW-MFA 编制方法导则以来,国家层面 EW-MFA 的直接流指标核算逐步得到了标准化,目前已经形成了成熟的核算框架和规范的数据库。国际上四大不同特色的国家层面 EW-MFA 直接流指标数据库见表 1。随着国家层面 EW-MFA 核算的标准化,核算所得数据的一致性也逐步增加。研究表明,除澳大利亚联邦科学与工业研究组织的数据库外,表 1 中其他三大数据库之间的指标数据差异在 10%—20%之间^[9]。这些数据库的建立,不仅扩展和丰富了 EW-MFA 的时空界限,而且使得 EW-MFA 越来越多的与其他方法相结合,成为定量研究社会经济与资源环境等问题的重要工具。

中国的 EW-MFA 直接流指标核算研究始于 2000 年左右,国内外先后对中国开展 EW-MFA 核算研究的人员及其文章发表年份为:Chen 和 Qiao,2001^[35];刘敬智等,2005^[36];李刚等,2005^[37];刘滨等,2006^[38];徐明和张天柱,2007^[39];段宁等,2008^[40];朱远,2007^[41];钟若愚,2009^[42];王亚菲,2010^[43];Wang 等,2012^[44]。由于对核算方法理解的差异,以及对资源(特别是对于砂石资源和生物质资源)取舍的不同等各种原因,国内外各机构对 EW-MFA 核算得到的直接流指标在数据上还具有较大的差异。

表 1 世界四大国家层面 EW-MFA 直接流指标数据库
Table 1 Four international databank for EW-MFA indicators

机构 Organization	数据库中的指标 Indicators in the databank	访问地址 Network Address
欧盟统计局 Eurostat	1990 年以来,欧洲 31 个国家的 DEU, DMI, DMC 及子类资源	http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_ac_mfa&lang=en
澳大利亚联邦科学与工业研究组织 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	1970 年以来,亚太地区 59 个国家的 DEU 和 DMC 及子类资源	http://www.cse.csiro.au/forms/form-mf-start.aspx
可持续欧洲研究所 Sustainable Europe Research Institute	1980 年以来,世界 228 个国家和地区的 DEU, DMC 及其子类资源	www.materialflows.net
克拉根福大学社会生态研究所 Institute of Social Ecology, University of Klagenfurt	1900 年以来,世界总 DEU;世界 177 个国家 2000 年的 DEU 和 DMC	http://www.uni-klu.ac.at/socec/inhalt/1088.htm

目前而言,国家层面 EW-MFA 直接流指标的核算研究主要关注较长历史时间范围的指标核算、国际比较和解耦评价研究^[44-53]。

(二) 包含间接流或隐藏流的综合指标

由于包含间接流或隐藏流的综合指标(如 TMR 或 RMC 等)考虑了进出系统边界的各类物质的原生资源消耗当量(Raw Material Equivalent, RME)或国内开采的未使用量(Unused Domestic Extraction, UDE),其核算相对于直接流指标不仅过程更为复杂,而且所需数据量也更加庞大。目前国际学术界对包含间接流或隐藏流的综合指标研究还不多^[54],主要核算方法为:基于过程的生命周期分析法(Process-based Life Cycle Analysis, P-LCA);环境扩展的投入产出分析法(Environmentally Extended Input-Output Analysis, EE-IOA),包括环境扩展的单区域投入产出(Environmentally Extended Single-Region Input-Output, EE-SRIO)模型和环境扩展的多区域投入产出(Environmentally Extended Multi-Region Input-Output, EE-MRIO)模型;投入产出分析与生命周期分析的混合法(Hybrid of EE-IOA and P-LCA),如混合的环境扩展的多区域投入产出(Hybrid of EE-MRIO and P-LCA)模型等。国外典型的研究如:德国伍珀塔尔研究所的相关学者对德国、芬兰、荷兰、丹麦、英国等欧洲国家 TMR 与 TMC 的核算研究^[33,55];Schoer^[56-57], Dittrich^[58]等对欧盟 RMC 和世界贸易中隐含物质的核算研究等。

中国学者在 EW-MFA 研究中对包含间接流或隐藏流的综合指标核算很少,主要针对 TMR 的指标,包括:Chen 和 Qiao^[35]对中国 1990—1996 年 TMR 的核算;李刚等^[37]对中国 1995—2003 年 TMR 的核算;王亚菲^[43]对中国 1990—2008 年 TMR 的核算。这些文献的研究方法均为 P-LCA,由于所选取资源种类不一致,而且隐藏流的系数也具有较大差异,因此,核算所得的中国 TMR 结果差异也很大。目前而言,在中国 RMC 的核算研究方面,仅见 Wang 等^[59]对中国 1997, 2002 和 2007 年 RMC 的研究报道,未见对中国 TMC 的核算研究报道。

由于 RMC 等指标涵盖了经济系统生命周期过程的物质利用量,弥补了 DMC 等指标在加和(Aggregation)过程的“不对称性”的缺陷(即忽略了进出系统边界物质的上游消耗),能够体现国际间环境压力的转移,近些年来迅速成为研究的热点^[54,60-61]。美国科学院院刊最近刊载了 Wiedmann 等基于多区域投入产出模型研究世界各国 RMC 和资源产出率指标的论文^[60],该论文通过 RMC 与 DMC 的对比揭示了国际间资源环境压力的转移。

3.1.2 区域层面上 EW-MFA 指标核算

由于区域层面缺乏进出系统边界的物质统计数据(没有类似于国家层面的海关统计),国家层面 EW-MFA 标准核算框架无法在区域层面直接应用,因此区域 EW-MFA 指标的核算研究较少。尽管如此,国内外一些学者仍然参照国家层面 EW-MFA 的核算框架,结合投入产出分析等方法,对区域层面的直接流指标进行了估算研究^[62-68],并且尝试提出估算框架^[66]。国外和国内代表性的研究如:Tachibana 等^[67]对日本 Aichi 县 1980—2000 年 DMI 的估算;黄晓芬和诸大建^[68]对上海市 1990—2003 年 DMI 和 TMR 的测算。

尽管目前区域层面 EW-MFA 指标核算研究还没有形成成熟的方法和统一的研究框架,但由于 EW-MFA 指标在资源与环境政策领域的重要应用价值,区域层面 EW-MFA 指标的核算与评价逐渐成为当前研究的热点。近些年来,区域层面 EW-MFA 的理论与实践研究引起了中国相关部委的高度重视,也受到了国家“十一五”、“十二五”科技支撑计划重点项目的资助。

2009 年开始,在国家发改委和国家统计局的指导和国家“十一五”科技支撑计划重点项目的资助下,清华大学牵头开展了“循环经济评价考核指标测算技术研发及应用示范”研究工作,该课题构建了服务于实际决策需求的中国 EW-MFA 核算框架,对中国 1978—2010 年的 DMC 及资源产出率开展了核算;在省域层面上开展了与国家层面资源产出率相衔接的物质流核算研究(包括理论框架、核算方法及配套统计制度等),提出了基于原生资源消耗当量的省域层面资源产出率核算方法,并将其用于山西、山东、浙江等区域在 2010 年的统计试点工作中,验证了有关方法和试点方案的可行性。2011 年开始至今,在“十一五”研究工作的基础上,清华大学等单位在国家“十二五”科技支撑计划重点项目的资助下进一步开展“资源产出率核算方法及指标区域分解体系研究与示范”的研究工作,致力于构建区域层面源产出率的核算理论及指标的影响因素研究方法、研究区域资源产出率的分解方案并开展试点统计工作。

3.2 EW-MFA 指标变化原因研究

目前,对 EW-MFA 指标变化原因研究的基本研究方法包括:分解分析法和回归分析法。

3.2.1 基于分解分析法的 EW-MFA 指标变化原因研究

分解分析法是将因变量分解为与之相关的各独立自变量,解释因变量的影响因素的方法,主要包括:IPAT 方程直接分解法、指数分解分析(Index Decomposition Analysis, IDA)和结构分解分析(Structure Decomposition Analysis, SDA)。

(一)IPAT 方程直接分解法

IPAT 方程反映了环境影响与人口、富裕度和技术之间的关系,是解释环境影响变化原因的定量分析工具。基于 IPAT 方程的直接分解法也是研究 EW-MFA 指标变化原因最常用的方法,被广泛地用于定量解释国家层面和区域层面的 EW-MFA 指标(直接流指标和包含间接流或隐藏流的综合指标)的变化原因,国外和国内代表性的研究如:Schandl 和 West^[69]对中国、日本和澳大利亚 1975—2005 年 DMC 变化的 IPAT 分解分析;丁平刚等^[70]对海南省 1990—2008 年 DMI 变化的 IPAT 分解分析。

基于 IPAT 方程的 EW-MFA 指标分解分析的一般研究表明:人口和富裕度的增加对于 EW-MFA 指标的增长具有促进作用,而技术则具有相反的作用^[69-70]。IPAT 方程直接分解法能够提供一个指标变化原因的定量分析框架,其应用所需数据量少、方便快捷,但却无法考察经济系统内部的结构(如产业结构、需求结构等)和技术的变化对 EW-MFA 指标的影响。

(二)IDA 法

相对于 IPAT 方程直接分解法,IDA 能够从经济系统产业结构和技术的角度考察相关指标的变化原因,多用于定量分析能耗及碳排放等指标的变化原因。如 IDA 可将能耗总量的变化分解为结构效应、技术效应和规模效应,并定量研究三者对能耗总量变化的贡献。常用的 IDA 分解方法包括 Laspeyres 和 Divisia 分解法^[71-72]。以 IDA 研究 EW-MFA 指标变化原因的文献非常少,目前仅见两例报道^[73-74],代表性的研究如:Hoffren 等^[73]利用 IDA 对芬兰 1960—1996 年物质流指标分解为经济活动规模、产业结构和物质强度三大效应,其中,经济活动规模的增长是物质流指标增加的主要原因。

IDA 尽管能够深入到产业结构的层面研究 EW-MFA 指标的变化原因,但其应用需要分部门的物质流数据,数据获取难度相对较大。

(三)SDA 法

SDA 以投入产出分析为基础,相对于 IDA 而言能够提供更为丰富的经济系统的内部信息,特别是经济系统的需求结构信息,也是研究能耗、碳排放等指标变化原因的常用方法^[75-76]。如 SDA 可将能源强度的变化分

解为生产部门的能耗系数、完全需求系数、最终需求结构、最终需求规模和最终能源消耗系数这五方面的效应,从而解释能源强度的变化原因^[77]。常用的 SDA 分解方法可分为 Laspeyres 类分解法和 Divisia 类分解法^[76]。以 SDA 研究 EW-MFA 指标变化原因的文献非常少,目前仅见四例报道^[59,78-80],代表性的研究如:Weinzettel^[80]利用 SDA 将捷克 2000—2007 年 RMC 按子类资源分解为技术(包含“物质强度”和“列昂惕夫系数”)、需求结构和终端需求量三大效应,其中,终端需求结构对 RMC 的改变非常有限,而技术效应能降低大部分资源的 RMC。

SDA 尽管能够从经济系统投入产出的角度提供丰富信息,特别是能够从需求结构的角度解释 EW-MFA 指标的变化原因,但其应用所需数据量相对 IDA 更加庞大,过程也更为复杂。

3.2.2 基于回归分析法的 EW-MFA 指标变化原因研究

回归分析法的基本思想是利用统计回归的手段对不同的变量进行关联,提供变量间关系的定量的解释。以回归分析法研究 EW-MFA 指标变化原因的文献也较少,以下根据回归方程的类型对已有研究进行分类简要介绍。

(一)线性方程回归分析

目前而言,EW-MFA 指标(包括资源产出率指标)的线性回归分析可分为以下两类。第一、基于物质强度(Intensity of Use)理论选择解释变量,与 EW-MFA 指标进行线性回归分析^[31,81],代表性的研究如:Steger 和 Bleischwitz^[81]将欧盟 15 个国家 1980—2000 年的 DMC 和欧盟 27 个国家 1992—2000 年的 DMC 分别与技术进步、结构变化、基础设施投资、绿色市场的新生活方式等 68 个变量进行回归分析,其中,能源效率、建筑活动等是影响 DMC 的主要因素。第二、基于经验选择解释变量,与 EW-MFA 指标进行线性回归分析^[82-83],代表性的研究如:Gan 等^[83]对世界 51 个国家不同年份基于 DMC 的资源产出率与 18 个社会经济变量进行了回归分析,其中,收入水平、经济结构、能源结构、原生资源的进口量和出口量是资源产出率的五个主要的影响因素。

(二)非线性方程回归分析

通过构建非线性方程对 EW-MFA 指标进行回归分析的研究较少,目前仅见四例报道^[55,60,84,85],这些研究一般将非线性方程通过对数化转换为线性方程,对解释变量的弹性系数进行线性回归分析,代表性的研究如下。Steinberger 和 Krausmann^[85]对世界 165 个国家 2000 年的 DMC 及基于 DMC 的资源产出率分别与收入进行了指数回归,研究表明:DMC 与收入具有较高的相关性,回归方程的可决系数为 0.77。Wiedmann 等^[60]对世界 137 个国家 2008 年的 DMC 和 RMC,子类资源的 DMC 和 RMC,以及基于 DMC 和 RMC 的资源产出率,与人均收入、人均 DEU 和人口密度进行了回归分析,研究表明:DMC 和 RMC 对三者的弹性系数均为正。

回归分析法的应用需要一定的时间序列数据或空间面板数据,能够从统计学意义上识别 EW-MFA 指标的关键影响因素,并且为 EW-MFA 指标的变化提供简单直观的定量解释,但却无法从机理上揭示 EW-MFA 指标的变化原因。目前而言,尽管人均 GDP、人口密度等都曾被提出作为 EW-MFA 指标的重要影响因素,但各种不同的回归分析研究所识别的 EW-MFA 指标的影响因素具有较大差异。

3.2.3 EW-MFA 指标变化原因的研究述评

从方法本身而言,分解分析法和回归分析法各有其特点与数据需求。其中,IPAT 方程直接分解法和回归分析法关注系统的整体指标(如经济系统总能耗),而 IDA 和 SDA 则需进一步关注内部各子系统的指标^[72,76](如经济系统各行业能耗)。由于 EW-MFA 将社会经济系统视为黑箱,重点关注系统边界上各类不同的物质^[9,20],而较少关注经济系统内部的物质流动,这就使得 IDA 和 SDA 在 EW-MFA 指标变化原因的应用方面受到了较大的影响,主要体现在两方面:

第一,IDA 或 SDA 所需的数据可得性较差。由于 EW-MFA 指标核算以所定义的经济、环境和国家为系统边界,核算进出系统边界的各类资源,但除能源外的其他资源,特别是一些非耗散性资源(如铁资源)不具备以行业为系统边界的净消耗量的数据统计基础,从而限制了 IDA 和 SDA 的应用。

第二,IDA 或 SDA 得到的分行业“物质强度”指标的物理意义不明晰。从资源消耗的角度看,相对于耗散

性资源(如能源),非耗散性资源(如铁资源)分行业的净消耗量与其投入量具有较大差异,这就使得分行业的各类资源的物质流数据的具有不同的物理意义;从环境影响的角度看,不同类型的资源具有不同的环境影响,也使得分行业的各类资源的物质流数据具有不同的物理意义。在已有的 EW-MFA 指标 IDA 或 SDA 分解研究中,尽管分解得到的分行业“物质强度”指标被解释为“技术”^[59,73-74, 78-80],但由于这一指标中涵盖了具有不同物理意义各类资源,这一解释还不够全面,需进一步挖掘指标的含义。

总体而言,尽管以上各类方法在 EW-MFA 指标变化原因的研究中都得到了不同程度的应用,但仍存在不少问题:基于 IPAT 方程直接分解法的应用最多,但无法考察经济系统内部的结构和技术的变化对 EW-MFA 指标的影响;基于 IDA 和 SDA 的分解分析法应用很少,面临数据可得性及指标意义解释等问题;回归分析法具有一定的应用,但已有研究所识别的 EW-MFA 指标的影响因素差异较大。未来不仅需要加强对现有方法的研究,而且需开发新的方法和模型,从机理上研究 EW-MFA 指标的变化原因。

4 EW-MFA 的未来研究方向

总体而言,建立在 20 世纪 60 年代坚实的理论基础之上的 EW-MFA 在经历过五十年(特别是近二十多年)的发展和演化后,在概念层面、衡量和估算的标准化层面、方法获取数据的可靠性层面都已基本成熟,意味着 EW-MFA 核算方法的基本成熟^[9]。尽管如此,EW-MFA 还有许多问题有待进一步研究。图 2 系统地总结了 EW-MFA 的当前研究概要与未来研究趋势,主要分为以下四个方面:

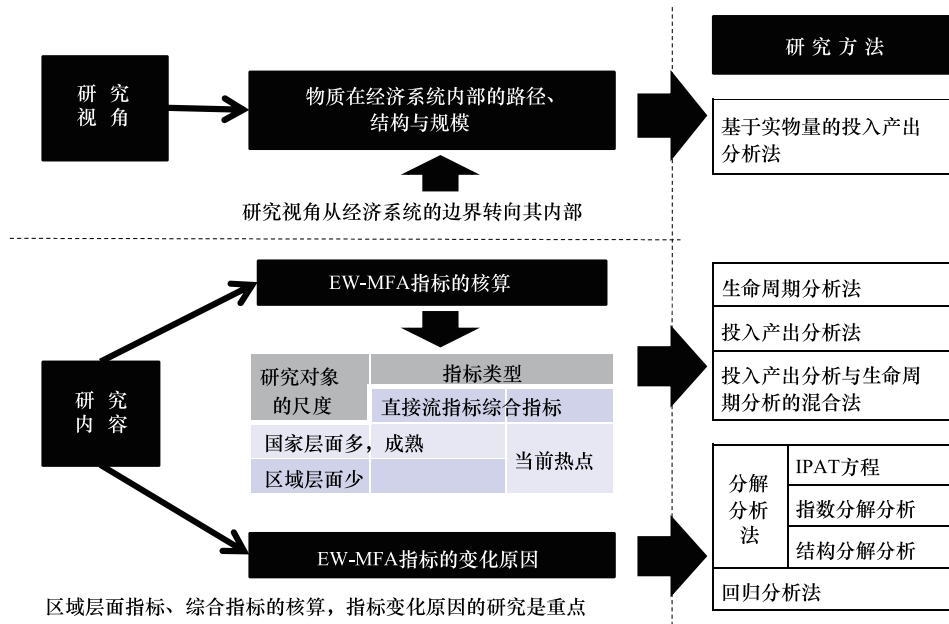


图 2 EW-MFA 的当前研究概要及未来研究趋势

Fig. 2 Current research outline and future research trends of EW-MFA

(1)物质在经济系统内部流动的路径、结构与规模研究。从研究视角来看,当前 EW-MFA 重点关注系统边界上的输入和输出物质,将社会经济系统视为黑箱,而较少关注经济系统内部物质流动的路径、结构和规模^[9,20]。然而,打开社会经济系统黑箱,从物质流的角度考察系统内部结构和规模,能够为全面监测和评价经济系统的运行状况提供有效工具,已经成为 EW-MFA 所关注的重点^[20]。尽管目前已有一些基于实物量投入产出表的分解研究尝试^[86-92],但未来需要进一步加强相关方法研究,其中,生命周期分析将有望在此方面发挥重要的作用。

(2)EW-MFA 对包含间接流或隐藏流的综合指标的核算研究。从 EW-MFA 的研究内容来看,由于核算或估算方法的不统一,以及数据的可得性较差等原因,当前对包含间接流或隐藏流的综合指标核算研究相对不

足^[9]。然而,这些综合指标能够衡量经济系统物质代谢的生命周期过程的资源利用量与环境压力,能够用于研究国际贸易中资源与环境压力转移的问题,因此,其研究不仅引起了越来越多的科学研究关注^[56-60,93-95],成为当前的研究热点,而且在政治层面上也有讨论。未来需要加强对这些指标的核算或估算方法的研究。

(3)EW-MFA 在区域层面的指标核算研究。从 EW-MFA 的研究内容来看,由于区域层面没有类似于国家层面的海关统计,缺乏进出系统边界的物质统计数据,国家层面 EW-MFA 标准框架无法在区域层面应用,区域层面还没有成熟的 EW-MFA 核算方法^[66-67]。然而,区域层面上资源与环境管理的实践对 EW-MFA 的核算理论研究提出了迫切的需求,未来需要加强对区域层面的 EW-MFA 核算研究,其中,生命周期分析法、投入产出分析法和投入产出分析与生命周期分析的混合法将有望在此方面发挥重要作用。

(4)EW-MFA 指标的变化原因研究。从 EW-MFA 的研究内容来看,当前对 EW-MFA 研究主要集中在 EW-MFA 指标的核算方面,对于 EW-MFA 指标的变化原因研究多通过 IPAT 方程直接分解法,无法考察经济系统内部的结构和技术的变化对 EW-MFA 指标的影响。尽管已有基于指数分解分析、结构分解分析和回归分析的研究方法对 EW-MFA 指标的变化原因进行了研究,但研究的文献少,而且所识别的 EW-MFA 指标的影响因素差异也较大。未来研究需要加强对 EW-MFA 指标变化原因研究。

对中国而言,“十二五”规划提出中国资源产出率提高 15%的目标^[34]后,如何提高资源产出率成为国民经济综合管理部门关心的重要问题。因此,系统地开展中国国家层面和省域层面 EW-MFA 指标核算,并且进一步研究 EW-MFA 指标的变化原因,不仅具有重要的理论意义,而且也具有迫切的现实意义。

参考文献 (References):

- [1] Brunner P H, Rechberger H. Practical Handbook of Material Flow Analysis. Boca Raton: Lewis Publishers, 2003.
- [2] 邢芳芳, 欧阳志云, 杨建新, 郑华, 罗婷文. 经济-环境系统的物质流分析. 生态学杂志, 2007, 26(2): 261-268.
- [3] 石垚, 杨建新, 刘晶茹, 陈波, 王如松. 基于 MFA 的生态工业园区物质代谢研究方法探析. 生态学报, 2010, 30(1): 228-237.
- [4] 施晓清, 杨建新, 王如松, 赵齐加. 产业生态系统资源代谢分析方法. 生态学报, 2012, 32(7): 2012-2024.
- [5] 黄和平, 毕军, 张炳, 李祥妹, 杨洁, 石磊. 物质流分析研究述评. 生态学报, 2007, 27(1): 368-379.
- [6] 张玲, 袁增伟, 毕军. 物质流分析方法及其研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6189-6198.
- [7] 钟琴道, 李艳萍, 乔琦. 物质流分析研究综述. 安徽农业科学, 2013, 41(17): 7395-7398, 7403-7403.
- [8] Fischer-Kowalski M. Society's metabolism, the intellectual history of materials flow analysis, Part I, 1860—1970. Journal of Industrial Ecology, 1998, 2(1): 61-78.
- [9] Fischer-Kowalski M, Krausmann F, Giljum S, Lutter S, Mayer A, Bringezu S, Moriguchi Y, Schütz H, Schandl H, Weisz H. Methodology and indicators of economy-wide material flow accounting: State of the art and reliability across sources. Journal of Industrial Ecology, 2011, 15(6): 855-876.
- [10] Fischer-Kowalski M, Hüttler W. Society's metabolism. The intellectual history of material flow analysis, Part II: 1970—1998. Journal of Industrial Ecology, 1998, 2(4): 107-137.
- [11] Wolman A. The metabolism of cities. Scientific American, 1965, 213(3): 179-190.
- [12] Ayres R U, Kneese A V. Production, consumption and externalities. American Economic Review, 1969, 59(3): 282-297.
- [13] Fischer-Kowalski M. The Work of Konstantin G. Gofman and Colleagues: An Early Example of Material Flow Analysis from the Soviet Union. [2014-02-08]. http://www.uni-klu.ac.at/socec/downloads/Gofman_94_web.pdf.
- [14] Bringezu S, Fischer-Kowalski M, Kleijn R, Palm V. Regional and National Material Flow Accounting: From Paradigm to Practice of Sustainability. [2014-02-08]. http://www.conaccount.net/pdf/ws_4.pdf.
- [15] Bringezu S, Fischer-Kowalski M, Kleijn R, Palm V. The ConAccount Agenda: The Concerted Action on Material Flow Analysis and its Research and Development Agenda [2014-02-08]. http://www.conaccount.net/pdf/ws_8.pdf.
- [16] Adriaanse A, Bringezu S, Hammond A, Moriguchi Y, Rodenburg E, Rogich D, Schütz H. Resource Flows: The Material Basis of Industrial Economies. [2014-02-08]. http://pdf.wri.org/resourceflows_bw.pdf.
- [17] Matthews E, Amann C, Bringezu S, Fischer-Kowalski M, Hüttler W, Kleijn R, Moriguchi Y, Ottke C, Rodenburg E, Rogich D, Schandl H, Schütz H, Van der voet E, Weisz H. The Weight of Nations. Material Outflows from Industrial Economies. [2014-02-08]. http://pdf.wri.org/weight_of_nations.pdf.

- [18] Eurostat. Economy-wide material flow accounts and derived indicators; A methodological guide. [2014-02-08]. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environmental_accounts/documents/3.pdf.
- [19] Eurostat. Economy-wide Material flow Accounts (EW-MFA); Compilation Guide 2013. [2014-02-08]. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environmental_accounts/documents/2013_EW-MFA_Guide_10Sep2013.pdf.
- [20] OECD. Measuring Material Flows and Resource Productivity. [2014-02-08]. <http://www.oecd.org/dataoecd/55/12/40464014.pdf>.
- [21] OECD. Resource Productivity in the G8 and the OECD; A Report in the Framework of the Kobe 3R Action Plan. [2014-04-08]. <http://www.oecd.org/env/waste/47944428.pdf>.
- [22] Reijnders L. The factor X debate: Setting targets for eco-efficiency. *Journal of Industrial Ecology*, 1998, 2(1): 13-22.
- [23] Kleijn R. Adding it all up: The sense and non-sense of Bulk-MFA. *Journal of Industrial Ecology*, 2001, 4(2): 7-8.
- [24] Lifset R. Moving from mass to what matters. *Journal of Industrial Ecology*, 2001, 4(2): 1-3.
- [25] Warr B, Ayres R, Eisenmenger N, Krausmann F, Schandl H. Energy use and economic development: A comparative analysis of useful work supply in Austria, Japan, the United Kingdom and the US during 100 years of economic growth. *Ecological Economics*, 2010, 69(10): 1904-1917.
- [26] Van der Voet E, Van Oers L, Nikolic I. Dematerialization; Not just a matter of weight. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 8(4): 121-137.
- [27] Moriguchi Y. Material flow indicators to measure progress toward a sound material-cycle society. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2007, 9(2): 112-120.
- [28] Ayres R U, Ayres L W. *A Handbook of Industrial Ecology*. Northampton; Edward Elgar, 2001.
- [29] Bartelmus P. *Quantitative Economics: How Sustainable Are Our Economies*. New York; Springer-Verlag, 2008.
- [30] Cleveland C J, Ruth M. Indicators of dematerialization and the materials intensity of use. *Journal of Industrial Ecology*, 1999, 2(3): 15-50.
- [31] Van der Voet E, van Oers L, van Moll S, Schütz H, Bringezu S, De Bruyn S, Sevenster M, Warringa G. Policy review on decoupling: Development of indicators to assess decoupling of economic development and environmental pressure in the EU-25 and AC-3 countries. CML, Leiden, Wuppertal; Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, Delft; CE Solutions for Environment, Economy and Technology.
- [32] Vehmas J, Luukkanen J, Kaivo-oja J. Linking analyses and environmental Kuznets curves for aggregated material flows in the EU. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(17): 1662-1673.
- [33] Bringezu S, Schütz H, Moll S. Rationale for and interpretation of economy-wide materials flow analysis and derived indicators. *Journal of Industrial Ecology*, 2003, 7(2): 43-64.
- [34] 国务院. 国务院关于印发循环经济发展战略及近期行动计划的通知. [2014-02-08]. http://www.gov.cn/zwjk/2013-02/05/content_2327562.htm.
- [35] Chen X Q, Qiao L J. A preliminary material input analysis of China. *Population and Environment*, 2001, 23(1): 117-126.
- [36] 刘敬智, 王青, 顾晓薇, 丁一, 刘建兴. 中国经济的直接物质投入与物质减量分析. *资源科学*, 2005, 27(1): 46-51.
- [37] 李刚, 张彦伟, 孙丰云. 中国环境经济系统的物质需求量研究. *中国软科学*, 2005, (11): 39-44.
- [38] 刘滨, 向辉, 王苏亮. 以物质流分析方法为基础核算我国循环经济主要指标. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(4): 65-68.
- [39] 徐明, 张天柱. 中国经济系统的物质投入分析. *中国环境科学*, 2005, 25(3): 324-328.
- [40] 段宁, 李艳萍, 孙启宏, 沈鹏, 毛玉如. 中国经济系统物质流趋势成因分析. *中国环境科学*, 2008, 28(1): 68-72.
- [41] 朱远. 中国提高资源生产率的适宜模式与推进策略研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [42] 钟若愚. 基于物质流分析的中国资源生产率研究. 北京: 中国经济出版社, 2009: 72-73.
- [43] 王亚菲. 经济系统可持续总量平衡核算——基于物质流核算的视角. *统计研究*, 2010, 27(6): 56-62.
- [44] Wang H M, Hashimoto S, Moriguchi Y, Yue Q, Lu Z W. Resource use in growing China - past trends, influence factors, and future demand. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(4): 481-492.
- [45] Kovanda J, Hak T. Changes in materials use in transition economies. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(5-6): 721-738.
- [46] Krausmann F, Gingrich S, Eisenmenger N, Erb K H, Haberl H, Fischer-Kowalski M. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 2009, 68(10): 2696-2705.
- [47] Kovanda J, Hak T. Historical perspectives of material use in Czechoslovakia in 1855-2007. *Ecological Indicators*, 2011, 11(5): 1375-1384.
- [48] Krausmann F, Gingrich S, Nourbakhch-Sabet R. The metabolic transition in Japan; A material flow account for the period from 1878 to 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15(6): 877-892.
- [49] Gierlinger S, Krausmann F. The physical economy of the United States of America: Extraction, trade, and consumption of materials from 1870 to 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(3): 365-377.
- [50] Singh S J, Krausmann F, Gingrich S, Haberl H, Erba K H, Lanz P, Martinez-Alier J, Temper L. India's biophysical economy, 1961-2008. Sustainability in a national and global context. *Ecological Economics*, 2012, 76: 60-69.
- [51] Kovanda J, Hak T. What are the possibilities for graphical presentation of decoupling? An example of economy-wide material flow indicators in the

- Czech Republic. *Ecological Indicators*, 2007, 7(1): 123-132.
- [52] Yu Y D, Chen D J, Zhu B, Hu S Y. Eco-efficiency trends in China, 1978-2010: decoupling environmental pressure from economic growth. *Ecological Indicators*, 2013, 24: 177-184.
- [53] 余亚东, 朱兵, 陈定江, 胡山鹰. 中国资源利用与经济增长间关系的解耦分析——基于国内资源开采使用量. *技术经济*, 2011, 30(10): 49-53, 108-108.
- [54] Giljum S, Lutter S, Bruckner M, Aparcana S. State-of-play of National Consumption-based Indicators. [2014-02-08]. http://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/FootRev_Report.pdf.
- [55] Bringezu S, Schütz H, Steger S, Baudisch J. International comparison of resource use and its relation to economic growth: The development of total material requirement, direct material inputs and hidden flows and the structure of TMR. *Ecological Economics*, 2004, 51(1-2): 97-124.
- [56] Schoer K, Weinzettel J, Kovanda J, Giegrich J, Lauwigi C. Raw material consumption of the European Union-concept, calculation method, and results. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(16): 8903-8909.
- [57] Schoer K, Wood R, Arto I, Weinzettel J. Estimating raw material equivalents on a macro-level: Comparison of multi-regional input-output analysis and hybrid LCI-IO. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(24): 14282-14289.
- [58] Dittrich M, Bringezu S, Schütz H. The physical dimension of international trade, part 2: Indirect global resource flows between 1962 and 2005. *Ecological Economics*, 2012, 79: 32-43.
- [59] Wang H M, Tian X, Tanikawa H, Chang M, Hashimoto S, Moriguchi Y, Lu Z W. Exploring China's materialization process with economic transition: Analysis of raw material consumption and its socioeconomic drivers. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(9): 5025-5032.
- [60] Wiedmann T O, Schandl H, Lenzen M, Moran D, Suh S, West J, Kanemoto K. The material footprint of nations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, doi: 10.1073/pnas.1220362110.
- [61] European Commission. Summary of Answers to the Stakeholder Consultation on 'Options for Resource Efficiency Indicators'. [2014-02-08]. http://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/documents/summary_of_responses.pdf.
- [62] Schulz N B. The direct material inputs into Singapore's development. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(2): 117-131.
- [63] Niza S, Rosado L, Ferrão P. Urban metabolism: methodological advances in urban material flow accounting based on the Lisbon case study. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(3): 384-405.
- [64] Barles S. Urban metabolism of Paris and its region. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(6): 898-913.
- [65] Hodson M, Marvin S, Robinson B, Swilling M. Reshaping urban infrastructure: Material flow analysis and transitions analysis in an urban context. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(6): 789-800.
- [66] 石磊, 楼俞. 城市尺度物质流分析的框架及测算方法. *环境科学研究*, 2008, 21(4): 196-200.
- [67] Tachibana J, Hirota K, Goto N, Fujie K. A method for regional-scale material flow and decoupling analysis: A demonstration case study of Aichi prefecture, Japan. *Resources, Conservation and Recycling*, 2008, 52(12): 1382-1390.
- [68] 黄晓芬, 诸大建. 上海市经济-环境系统的物质输入分析. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(3): 96-99.
- [69] Schandl H, West J. Material flows and material productivity in China, Australia, and Japan. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(3): 352-364.
- [70] 丁平刚, 田良, 陈彬. 海南省环境经济系统的物质流特征与演变. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(8): 66-71.
- [71] Ang B W, Zhang F Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy*, 2000, 25(12): 1149-1176.
- [72] 张炎治, 晁锐. 能源强度的指数分解分析研究综述. *管理学报*, 2008, 5(5): 647-650.
- [73] Hoffrén J, Luukkanen J, Kaivo-Oja J. Decomposition analysis of Finnish material flows: 1960—1996. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 4(4): 105-125.
- [74] Hashimoto S, Matsui S, Matsuno Y, Nansai K, Murakami S, Moriguchi Y. What factors have changed Japanese resource productivity? A decomposition analysis for 1995—2002. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(5-6): 657-668.
- [75] Hoekstra R, van den Bergh J C J M. Structural decomposition analysis of physical flows in the economy. *Environmental and Resource Economics*, 2002, 23(3): 357-378.
- [76] Su B, Ang B W. Structural decomposition analysis applied to energy and emissions: Some methodological developments. *Energy Economics*, 2012, 34(1): 177-188.
- [77] 夏炎, 杨翠红, 陈锡康. 中国能源强度变化原因及投入结构的作用. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(3): 442-448.
- [78] Moll S, Hinterberger F, Femia A, Bringezu S. An Input-Output Approach to Analyse the Total Material Requirement (TMR) of National Economies. [2014-02-08]. <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/proc-con98.pdf#page=45>.
- [79] Pablo Muñoz J, Hubacek K. Material implication of Chile's economic growth: Combining material flow accounting (MFA) and structural decomposition analysis (SDA). *Ecological Economics*, 2008, 65(1): 136-144.
- [80] Weinzettel J, Kovanda J. Structural decomposition analysis of raw material consumption: the case of the Czech Republic. *Journal of Industrial*

- Ecology, 2011, 15(6): 893-907.
- [81] Steger S, Bleischwitz R. Drivers for the use of materials across countries. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(8): 816-826.
- [82] Weisz H, Krausmann F, Amann C, Eisenmenger N, Erb K H, Hubacek K, Fischer-Kowalski M. The physical economy of the European Union: Cross-country comparison and determinants of material consumption. *Ecological Economics*, 2006, 58(4): 676-698.
- [83] Gan Y, Zhang T Z, Liang S, Zhao Z N, Li N. How to deal with resource productivity: Relationships between socioeconomic factors and resource productivity. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 17(3): 440-451.
- [84] Steinberger J K, Krausmann F, Eisenmenger N. Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis. *Ecological Economics*, 2010, 69(5): 1148-1158.
- [85] Steinberger J K, Krausmann F. Material and energy productivity. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(4): 1169-1176.
- [86] Pedersen O G. Physical Input-output Tables for Denmark, 1990. [2014-02-08] http://millenniumindicators.un.org/unsd/envaccounting/ceea/archive/MFA/Physical_IO_Tables_for_Denmark.PDF.
- [87] Giljum S, Hubacek K. Alternative approaches of physical input-output analysis to estimate primary material inputs of production and consumption activities. *Economic Systems Research*, 2004, 16(3): 301-310.
- [88] Suh S. A note on the calculus for physical input-output analysis and its application to land appropriation of international trade activities. *Ecological Economics*, 2004, 48(1): 9-17.
- [89] Dietzenbacher E. Waste treatment in physical input-output analysis. *Ecological Economics*, 2005, 55(1): 11-23.
- [90] Hoekstra R, van den Bergh J C J M. Constructing physical input-output tables for environmental modeling and accounting: Framework and illustrations. *Ecological Economics*, 2006, 59(3): 375-393.
- [91] Weisz H, Duchin F. Physical and monetary input-output analysis: What makes the difference? *Ecological Economics*, 2006, 57(3): 534-541.
- [92] Dietzenbacher E, Giljum S, Hubacek K, Suh S. Physical input-output analysis and disposals to nature // Suh S. *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*. Netherlands: Springer, 2009: 123-137.
- [93] Giljum S, Behrens A, Hinterberger F, Lutz C, Meyer B. Modelling scenarios towards a sustainable use of natural resources in Europe. *Environmental Science and Policy*, 2008, 11(3): 204-216.
- [94] Muñoz P, Giljum S, Roca J. The raw material equivalents of international trade: Empirical evidence for Latin America. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(6): 881-897.
- [95] Weinzettel J, Kovanda J. Assessing socioeconomic metabolism through hybrid life cycle assessment: The case of the Czech Republic. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(4): 607-621.